



## GEOLOGY AND GEOCHEMISTRY OF SYNPLUTONIC DYKES IN THE CHELYABINSK GRANITOID MASSIF, SOUTH URALS

G. A. Kallistov<sup>1,2</sup>, T. A. Osipova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

**Abstract:** We present the results of geological, petro-geochemical and mineralogical studies of synplutonic intrusive formations in the Chelyabinsk granitoid massif, South Urals. Numerous synplutonic intrusions in the study area are in early phases, composed of quartz diorites and granodiorites of the Late Devonian – Early Carboniferous. Such intrusions are represented by a bimodal series of rocks from gabbro-diorite to plagioclase granite. Both the mafic and salic members of the series form separate independent dykes and, jointly, compose the dyke bodies of complex structures. With respect to the relationships with host rocks, two types of the studied dykes are distinguished: (1) 'classical' synplutonic dykes with monolithic bodies that are split along strike by the enclosing granodiorite into separate fragments; and (2) 'post-granite' dykes that clearly break through the host quartz diorites and granodiorites that are older than the dykes, but show similar isotope ages: the U-Pb-Shrimp ages of zircon in the samples taken from the dyke and the host quartz diorite are  $362 \pm 4$  и  $358 \pm 5$  Ma, respectively. The first group includes the dyke of melanocratic diorite, the second – granitoid dykes and dykes of gabbro-diorites and diorites. The intrusion of acid rocks preceded the basites and was completed after their formation. As a result of the nearly simultaneous intrusion of both, the dykes of complex structures were formed. The material compositions of mafic rocks in these two groups are significantly different. The 'post-granite' dioritoids are moderately alkaline. Melanodiorite in the synplutonic dyke belongs to normal alkaline rocks. It has a very high content of MgO (12.5 mass %) and is sharply enriched with chromium (~700 ppm vs. 100–350 ppm in the 'post-granite' dykes). It is thus closer to sanukitoids. The acid 'post-granite' dykes vary in composition from plagioclase granite and adamellite to tonalite. They are normal-alkaline. Their chemical compositions often do not correspond to cotectic ones. The dioritoids have nearly zero values of  $\epsilon_{\text{Nd}}$  (from +1 to –2), and the values of  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  vary from 0.70485 to 0.70571. The granitoids are typically characterized by negative values of  $\epsilon_{\text{Nd}}$  (from –2 to –5) and, generally, more radiogenic strontium ( $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70517–0.70567$ ). The established isotopic compositions of Nd and Sr in the synplutonic dykes of the Chelyabinsk Massif give evidence of different sources for the coexisting salic and mafic melts, but do not fit a model of simple mixing of the two components.

**Key words:** granitoid; synplutonic intrusion; coexisting melts; high-Mg diorite; Southern Urals; Chelyabinsk massif

### RESEARCH ARTICLE

Recommended by E.V. Sklyarov

Received: September 27, 2016

Revised: January 23, 2017

Accepted: January 26, 2017

**For citation:** Kallistov G.A., Osipova T.A., 2017. Geology and geochemistry of synplutonic dykes in the Chelyabinsk granitoid massif, South Urals. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (2), 331–345. doi:10.5800/GT-2017-8-2-0244.

**Для цитирования:** Каллистов Г.А., Осипова Т.А. Геология и геохимия синплутонических даек в Челябинском гранитоидном массиве (Южный Урал) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 2. С. 331–345. doi:10.5800/GT-2017-8-2-0244.

# ГЕОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ СИНПЛУТОНИЧЕСКИХ ДАЕК В ЧЕЛЯБИНСКОМ ГРАНИТОИДНОМ МАССИВЕ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Г. А. Каллистов<sup>1,2</sup>, Т. А. Осипова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

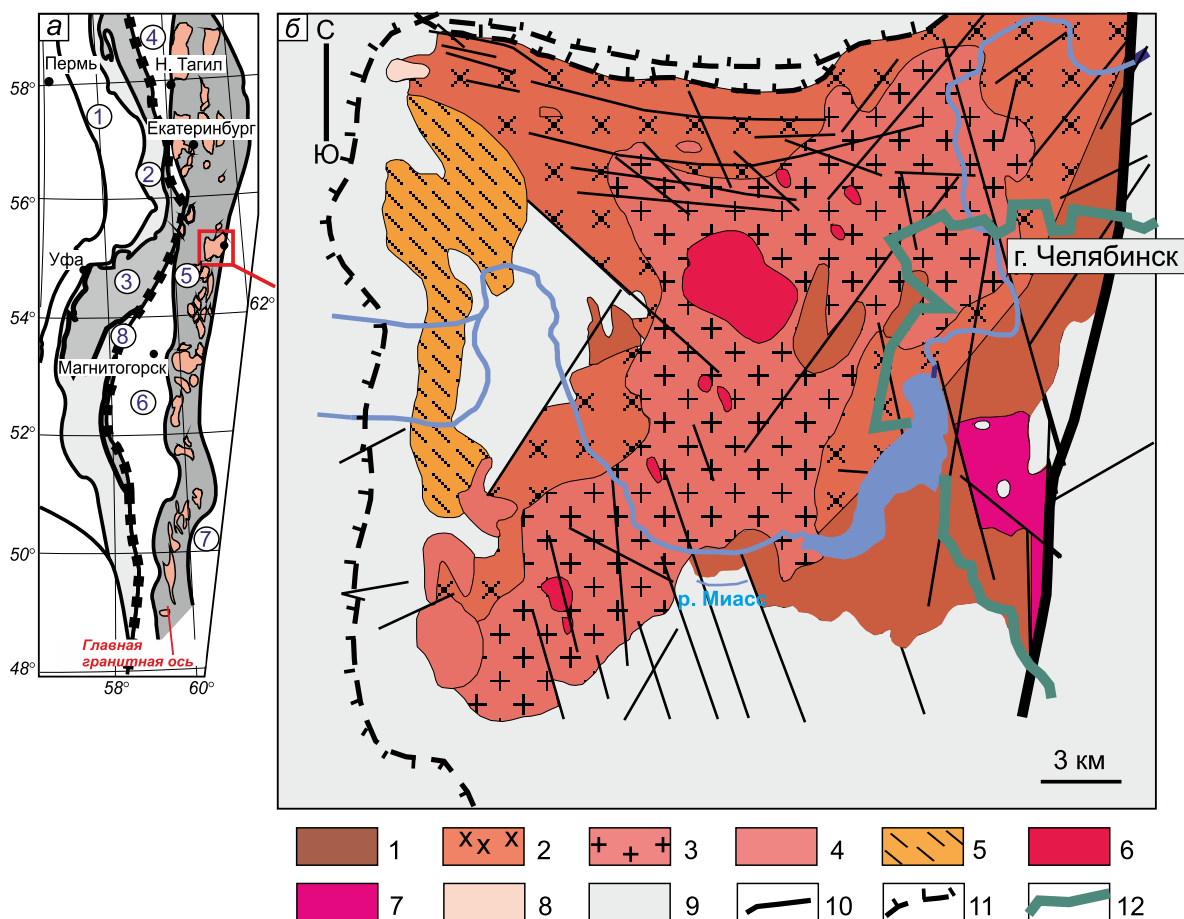
**Аннотация:** Приводятся результаты геологического, петролого-геохимического и минералогического изучения синплутонических интрузивных образований в Челябинском гранитоидном массиве на Южном Урале. Синплутонические интрузии в Челябинском массиве распространены в его ранних фазах, сложенных кварцевыми диоритами и гранодиоритами позднедевонско-раннекаменноугольного возраста, и представлены бимодальной серией пород от габбро-диорита до плагиолейкогранита. И мафические, и салические члены серии как слагают отдельные самостоятельные дайки, так и совместно образуют дайковые тела сложного строения. На основании взаимоотношений с вмещающими породами выделяется две группы даек: 1) «классическая» синплутоническая дайка, монолитное тело которой по простиранию разделяется на отдельные фрагменты вмещающим гранодиоритом; 2) «постгранитные» дайки, отчетливо прорывающие вмещающие кварцевые диориты и гранодиориты, более поздние по отношению к ним, но изотопно одновозрастные с ними: U-Pb-Shrimp возраст циркона из материала дайки и вмещающего кварцевого диорита составляет  $362 \pm 4$  и  $358 \pm 5$  млн лет соответственно. К первой группе относится дайка меланократового диорита, ко второй – гранитоидные дайки и дайки габбро-диоритов и диоритов. Внедрение кислых пород предшествует базитам, а завершается после них, при близко-одновременном внедрении тех и других образуются дайки сложного строения. Вещественный состав мафических пород выделенных групп существенно различен. «Постгранитные» диоритоиды относятся к умереннощелочным, а меланоидиорит синплутонической дайки – к нормально-щелочным породам. Для последнего характерны очень высокие содержания MgO (12.5 мас. %) и резкое обогащение хромом (~700 ppm против 100–350 ppm в постгранитных дайках), что сближает его с санукитоидами. Кислые постгранитные дайки по составу варьируются от плагиолейкогранита и адамеллита до тоналита и являются нормально-щелочными. Валовый химический состав их часто не отвечает котектическому. Диоритоиды характеризуются близкими к «0» значениями  $\epsilon_{Nd}$  (от +1 до -2) и вариациями значений  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$  от 0.70485 до 0.70571. Для гранитоидов типичны отрицательные величины  $\epsilon_{Nd}$  (от -2 до -5) и, в целом, более радиогенный стронций ( $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.70517-0.70567$ ). Имеющиеся данные об изотопном составе Nd и Sr в синплутонических дайках Челябинского массива свидетельствуют о разных источниках сосуществующих салических и мафических расплавов, но при этом не отвечают простой модели смешения двух компонентов.

**Ключевые слова:** гранитоид; синплутоническая интрузия; сосуществующие расплавы; высокомагнезиальный диорит; Южный Урал; Челябинский массив

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Дайки базитового состава часто сопровождают внедрение гранитоидов. Синплутонические дайки основного и среднего состава, нередко представленные бимодальной серией (комбинированные дайки), известны во многих регионах, например в гранитных батолитах западного побережья Северной и Южной Америки, на Среднем Урале (Верхисетский массив), в Западном Забайкалье (Ангаро-Витимский батолит, Бургасский кварцево-сиенитовый плутон) и других. При внедрении таких базитовых интрузий во вмещающие существенно кислые гранитоиды происходит их взаимодействие, при котором, как правило, протекают процессы химического (миксинг) и механического смешения (минглинг).

Вопросы источников базитовых магм, процессов взаимодействия контрастных по составу расплавов продолжают обсуждаться в мировой и российской петрологической науке на протяжении многих десятков лет [Wiebe, 1973; Popov, 1984; Marshall, Sparks, 1984; Frost, Mahood, 1987; Barbarin, 1991; Pitcher, 1991; D'Lemos, 1992; Wiebe, Ulrich, 1997; Litvinovsky et al., 1995a; 1995b; Titov et al., 2000; Collins et al., 2000; Fedorovsky et al., 2003; Barbarin, 2005; Sklyarov, Fedorovskii, 2006; Burmakina, Tsygankov, 2010; Karmysheva et al., 2015; и др.]. Авторы исследований по данной проблематике предлагают различные модели образования синплутонических (в том числе комбинированных) даек, при этом подразумевая широкий спектр обстановок и условий взаимодействия контрастных по составу магм.



**Рис. 1.** Схема геологического строения Челябинского гранитоидного плутона (по данным Челябинского государственного геолого-геофизического предприятия, с дополнениями Т.А. Осиповой и Г.А. Каллистова) и его положение в структуре Урала (по [Puchkov, 2010]).

1–4 – высококалиевая серия: 1 – кварцевые диориты ( $D_3-C_1$ ), 2 – гранодиориты ( $D_3-C_1$ ), 3 – граниты биотитовые ( $C_1$ ), 4 – лейкограниты биотит-мусковитовые ( $C_1$ ); 5 – умереннокалиевая серия: граниты гнейсированные ( $C_{1-2}$ ); 6, 7 – субщелочная серия: 6 – лейкограниты биотитовые флюоритсодержащие ( $P_1$ ), 7 – лейкограниты биотитовые ( $P_2$ ); 8 – лейкограниты гранат-мусковитовые ( $T_2$ ); 9 – вмещающие метавулканоогенные и метасадочные породы ( $PZ_{1-2}$ ); 10 – разрывные нарушения; 11 – шарьяжи и надвиги; 12 – граница г. Челябинска. На врезке цифрами в кружках обозначены структурно-тектонические зоны Урала [Puchkov, 2010]: 1 – Предуральский прогиб, 2 – Западно-Уральская зона, 3 – Центрально-Уральская зона, 4 – Главный Уральский разлом, 5 – Тагило-Магнитогорская зона, 6 – Восточно-Уральская зона, 7 – Зауральская зона.

**Fig. 1.** Schematic geological structure of the Chelyabinsk granitoid pluton (according to data of Chelyabinsk State Geological and Geophysical Enterprise, added by T.A. Osipova and G.A. Kallistov) and its position in the Ural structure (after [Puchkov, 2010]).

1–4 – high-K series: 1 – quartz diorite ( $D_3-C_1$ ), 2 – granodiorite ( $D_3-C_1$ ), 3 – biotite granite ( $C_1$ ), 4 – leucogranite ( $C_1$ ); 5 – moderate-K series: gneissed granite ( $C_{1-2}$ ); 6, 7 – subalkaline series: 6 – biotite fluorite-bearing leucogranite ( $P_1$ ), 7 – biotite leucogranite ( $P_2$ ); 8 – garnet-muscovite leucogranite ( $T_2$ ); 9 – host metavolcanic and metasedimentary rocks ( $PZ_{1-2}$ ); 10 – faults; 11 – overthrust and thrusts; 12 – boundary of the city of Chelyabinsk. Numbers in the inset mark structural-tectonic zones of the Urals [Puchkov, 2010]: 1 – Pre-Ural trough, 2 – West Ural zone, 3 – Central Ural zone, 4 – Main Ural fault, 5 – Tagil-Magnitogorsk zone, 6 – East Ural zone, 7 – Trans-Ural zone.

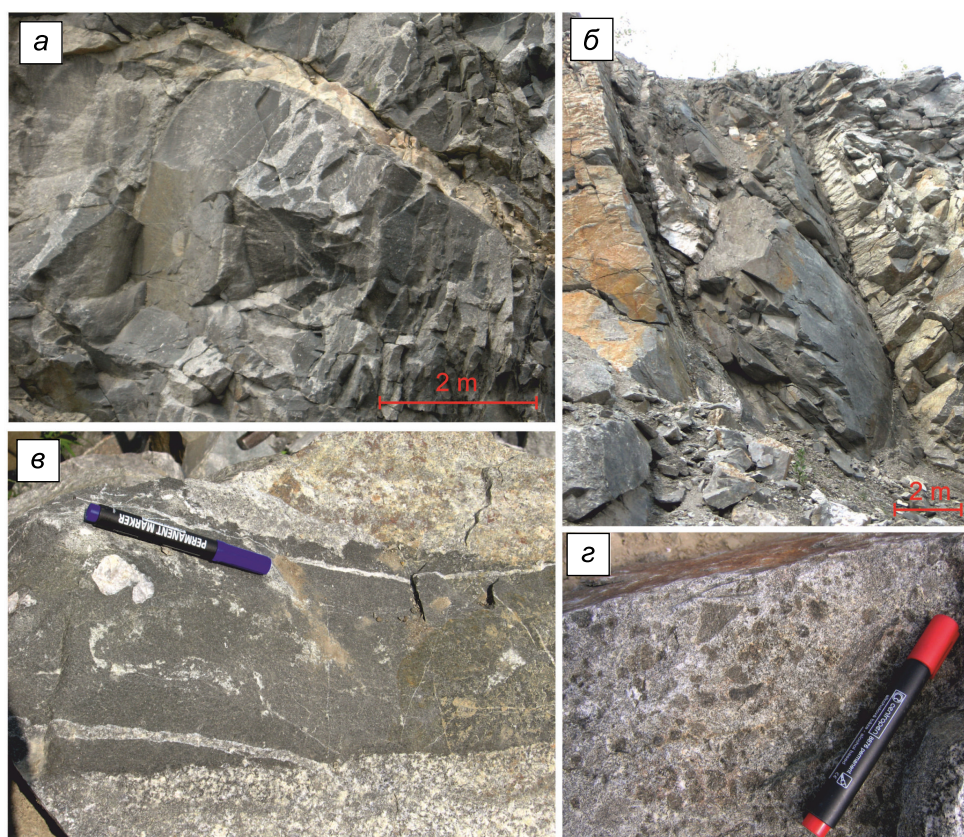
## 2. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ

Челябинский гранитоидный массив, образованный разновозрастными интрузивными комплексами, расположен в северном замыкании южного сегмента Восточно-Уральской зоны (ВУЗ), которая характеризуется широким распространением сиалического материала – гнейсовых комплексов и

цепочек многочисленных гранитоидных массивов, образующих так называемую Главную гранитную ось Урала (рис. 1).

В Челябинском массиве синплутонические дайки внедрены в позднедевонско-раннекаменноугольные кварцевые диориты и гранодиориты – породы ранней фазы (рис. 1). Они доступны для наблюдения в нескольких действующих каменных





**Рис. 2.** Синплутоническая и «постгранитные» дайки Челябинского массива.

*a* – синплутоническая дайка, разделяющаяся на отдельные фрагменты; *б-в* – «постгранитные» дайки: *б* – «простая» меланократовая дайка, *в* – комбинированная дайка; *з* – фрагменты тонкозернистого диорита округлой формы в дайке тоналита, залегающей среди кварцевых диоритов.

**Fig. 2.** Synplutonic and 'post-granite' dykes, Chelyabinsk massif.

*a* – synplutonic dyke split into fragments; *б-в* – 'post-granite' dykes: *б* – 'simple' melanocratic dyke, *в* – combined dyke; *з* – round-shaped fragments composed of fine-grained diorite in the tonalite dyke observed in quartz diorites.

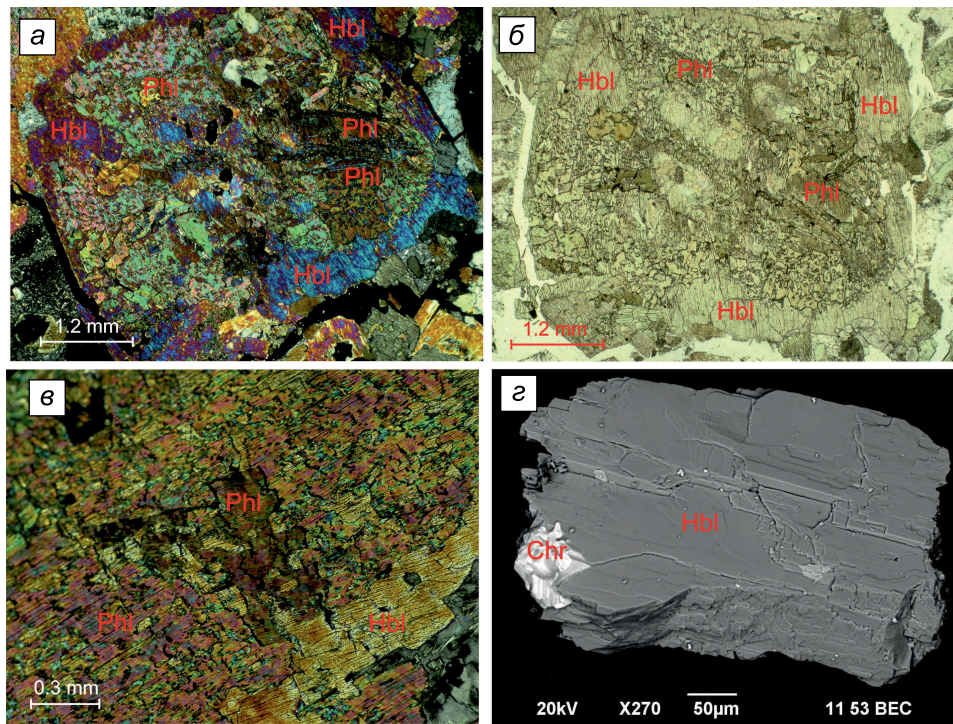
карьерах в черте г. Челябинска и его окрестностях. Основные черты строения и состава некоторых из них рассмотрены в работе [Fershtater et al., 2004].

Мощность даек варьируется от менее 0.5 м до более 1 м, в редких случаях достигая 3–4 м. Все они полностью раскристаллизованы и имеют отчетливо интрузивный облик. По последовательности внедрения и взаимоотношениям с вмещающими породами рассматриваемые дайки Челябинского массива составляют две группы: 1) «классические» синплутонические дайки, тело которых по простиранию разделяется на отдельные фрагменты вмещающей кислой породой (рис. 2, *a*) [Pitcher, 1991]; 2) «постгранитные» дайки – отчетливо прорывающие вмещающие гранодиориты и кварцевые диориты, более поздние по отношению к ним (рис. 2, *б, в*). При этом изотопный (U-Pb-Shrimp) возраст циркона из материала дайки и вмещающего кварцевого диорита одинаков:  $362 \pm 4$  и  $358 \pm 5$  млн лет, соответственно.

В первом случае сплошное монолитное материнское тело дайки, залегающее среди гранодиоритов, по простиранию делятся на отдельные фрагменты неправильной формы, которые в совокупности образуют изначально плотное скопление – «рой», вытянутый по простиранию дайки. По мере удаления от материнского тела плотность «роя» уменьшается вплоть до отдельных включений, а их очертания становятся более округлыми. При этом ни дайка, ни вмещающие гранодиориты не имеют закаленных контактов.

Дайки второй группы характеризуются ровными, практически плоскими контактами с вмещающими кварцевыми диоритами и гранодиоритами, выдержанностью по мощности и целостностью по простиранию. По своему внутреннему строению постгранитные дайки можно разделить на две группы: простые и комбинированные.

Простые дайки характеризуются однородностью состава и отсутствием каких-либо фрагмен-



**Рис. 3.** Микрофото меланодиорита (а–в) и BSE-изображения хромита (г) из синплутонической дайки (Чл-484).

а – псевдоморфное замещение пироксена амфиболом и флогопитом – (ник. +); б – то же (ник. ||); в – замещение магнезиальной роговой обманки флогопитом (ник. +); г – срастание магнезиальной роговой обманки с хромитом.

**Fig. 3.** Micrograph of melanodiorite (a–c) and BSE-image of chromite (d) from the synplutonic dyke (Чл-484).

а – pseudomorphic replacement of pyroxene with amphibole and phlogopite – (nicols +); б – same (nicols ||); в – replacement of magnesian hornblende with phlogopite (nicols +); г – fusion of magnesian hornblende and chromite.

тов и включений пород кислого состава (рис. 2, б). Комбинированные дайки представлены ассоциацией кислого и базитового материала с существенным преобладанием по объему последнего (рис. 2, в). Породы кислого состава – лейкократовые мелкозернистые гранитоидные «каймы» и/или прожилки. Прожилки, мощность и количество которых сильно варьируются, разделяют дайки на угловатые, иногда округло-угловатые фрагменты и часто содержат ксенолиты как вмещающих гранитоидов, так и пород даек. Важно отметить, что наряду с ассоциирующими с базитами присутствуют и самостоятельные, не связанные пространственно с меланократовыми, простые по своему строению гранитоидные жильные тела различной мощности (от первых десятков сантиметров до одного метра), внедрение которых предшествует базитам, а завершается после них. Но в отдельных случаях их внедрение происходит совместно. Так, в западной приконтактной части массива (карьер близ д. Костыли) кварцевые диориты прорваны дайкой мелкозернистого тоналита, в котором заключены фрагменты тонкозернистого диорита округлой и неправильной формы, ограниченные

фестончатыми контактами (рис. 2, г), характерными для кристаллизации одновременно внедряющихся основных и кислых магм [D'Lemos, 1992].

Синплутоническая дайка и «постгранитные» комбинированные дайки являются в текстурно-морфологическом отношении одним из вариантов проявления процессов механического смешения (минглинга) [Wiebe, 1973; Sklyarov, Fedorovskii, 2006].

### 3. ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Синплутоническая дайка сложена меланократовым диоритом, характеризуется массивной текстурой и порфировидной структурой, обусловленной присутствием фенокристаллов (5–6 мм в поперечнике) амфибола и, вероятно, пироксена – в настоящее время сохранились лишь псевдоморфозы амфибола или амфибола и флогопита по пироксену (рис. 3, а, б). Иногда фенокристы амфибола (магнезиальная роговая обманка) содержат включения крупных, занимающих почти всю площадь зерна,



резорбированных чешуй флогопита (рис. 3, в). Структура основной массы гипидиоморфно-зернистая в сочетании с пойкилитовой: интерстиции между крупными выделениями темноцветных минералов выполнены резко ксеноморфным кислым плагиоклазом, который содержит включения мелких идиоморфных зерен амфибола, призмы апатита, редко – кварц. Последний изредка также присутствует в интерстициях в виде отдельных ксеноморфных зерен. Характерные акцессории – апатит, иглы которого достигают 2 мм в длину, циркон, кристаллы которого представлены двумя морфотипами: удлинённым до игольчатого и короткопризматическим до субизометричного, магнетит, титанит, единичные зерна ильменита и рутила. Важной чертой является наличие в породе хромита, который образует срастания с темноцветными минералами и включения в них (рис. 3, г). Порода подвержена эпигенетическим изменениям: первичные магнезиальная роговая обманка и, вероятно, пироксен практически нацело псевдоморфно замещены актинолитом и, местами, вторичным биотитом и хлоритом, среди которых встречаются лишь реликтовые фрагменты неизмененного первичного амфибола. Плагиоклаз в настоящее время деанортизирован – представлен агрегатом серицита с эпидотом.

Все постгранитные меланократовые дайки – и простые, и комбинированные – близки между собой по минерально-петрографическому составу и текстурно-структурным особенностям. Они представлены монцогаббро и монцодиоритами, диоритами с массивной текстурой и мелко- до среднезернистой структурой, чаще равномерно-зернистой, но иногда порфирированной за счет более крупных выделений субидиоморфного амфибола. Микроструктура панидиоморфно-зернистая. Сложены плагиоклазом (андезин – олигоклаз) и амфиболом (обыкновенная роговая обманка) в различных соотношениях (35–60 и 30–50 об. %, соответственно), биотитом (5–20 об. %) с резко подчиненным количеством (первые проценты) каликатрового полевого шпата и кварца, выполняющих интерстиции и распределенных неравномерно в массе породы. Акцессорные минералы представлены эпидотом, апатитом, цирконом, иногда титанитом и магнетитом. Вторичные изменения выражены в актинолитизации амфибола и сосюритизации плагиоклаза.

Дайки гранитоидов варьируются по составу от гранодиорита до лейкоплагиогранита, характеризуются массивной текстурой и равномерно-зернистой, преимущественно среднезернистой, структурой, гипидиоморфно-зернистой микроструктурой. Простые дайки сложены плагиогранитами и лейкоплагиогранитами. Салическая часть комби-

нированных даек представлена гранодиоритами и лейкоплагиогранитами.

Главные породообразующие минералы – кварц, образующий ксеноморфные выделения (20–40 об. %), преимущественно идиоморфный слабозональный плагиоклаз (от олигоклаза до альбита, до 50–55 об. %), ксеноморфные зерна микроклина (от единичных зерен до 10 об. %) и биотит (до 10 %). Соотношение полевых шпатов и кварца, а также содержание биотита сильно меняются в зависимости от основности породы. Главные акцессорные минералы – апатит и циркон. Вторичные изменения в разных дайках проявлены в разной степени и выражены в деанортизации плагиоклаза (замещении агрегатом серицита с эпидотом, реже – сосюритизации), альбитизации микроклина с образованием «шахматного» альбита, хлоритизации биотита.

#### 4. ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Химический состав рассматриваемых пород представлен в таблице. Меланократовые дайки варьируются по содержанию кремнезема от 50.68 до 56.03 мас. %, дайки гранитоидов – от 61.45 до 75.05 мас. %.

Породы всех меланократовых даек принадлежат к высокальемому ряду, однако меланократовый диорит синплутонической дайки существенно отличается по вещественному составу от «постгранитных» даек (рис. 4, 5). По сравнению с синплутонической, почти все постгранитные дайки содержат больше щелочных металлов и относятся к породам умеренной щелочности, тогда как мелано-диорит синплутонической дайки является нормально-щелочным. Наряду с этим, мелано-диорит синплутонической дайки обеднен  $Al_2O_3$  и Sr при более высоких концентрациях CaO, заметно обогащен Cr, а также Co и Ni. В постгранитных диоритоидах отмечается отчетливая положительная корреляция содержания магния и сидерофильных элементов (Cr, Co, Ni). Наиболее яркой чертой химизма синплутонической дайки является очень высокое содержание MgO (12.5 мас. %), что определяет присутствие оливина в нормативном составе породы.

Все диоритоиды являются диопсид-нормативными, при этом степень насыщения пород глиноземом относительно стехиометрии полевых шпатов несколько возрастает с уменьшением основности. Гранитоиды практически насыщены глиноземом:  $Al_2O_3 - A/CNK = 0.9 - 1.1$  (рис. 5).

Мультиэлементные спектры во всех меланократовых дайках Челябинского массива характеризуются умеренной степенью дифференциации и практически отсутствием или слабовыраженной

## Химический состав синплутонической и «постгранитных» даек Челябинского массива

## Chemical compositions of synplutonic and 'post-granite' dykes, Chelyabinsk massif

	1	2	3	4	5	6a	6b	7a	7b
Компонент	Chl-484	Chl-112a	Chl-427	Chl-259	Chl-246	Chl-329	Chl-328	Chl-347	Chl-346
SiO <sub>2</sub>	52.09	52.11	52.87	54.40	55.00	51.21	67.21	53.39	66.88
TiO <sub>2</sub>	0.78	0.78	0.94	0.89	0.83	1.27	0.47	0.92	0.41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.7	13.23	13.94	15.89	14.66	16.37	15.87	16.60	16.83
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	8.51	9.37	9.78	9.39	8.3	8.16	3.01	7.48	2.89
MnO	0.14	0.2	0.16	0.16	0.17	0.15	0.05	0.15	0.05
MgO	12.53	7.24	6.37	4.63	5.31	5.97	1.83	4.58	1.34
CaO	8.63	9.22	7.22	6.52	7.27	7.19	4.41	6.38	3.20
Na <sub>2</sub> O	2.25	3.8	2.8	3.23	3.69	3.55	4.66	3.08	3.7
K <sub>2</sub> O	1.78	1.39	3.34	2.75	2.4	3.33	1.29	3.82	2.84
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.23	0.32	0.33	0.22	0.3	0.85	0.16	0.58	0.15
LOI	1.7	1.41	1.5	1.44	1.09	1.5	0.67	2.23	1.25
Сумма	100.42	98.76	99.72	99.97	99.02	99.89	99.77	99.71	99.73
A/CNK	0.55	0.56	0.65	0.79	0.67	0.72	0.93	0.79	1.12
Mg#	0.74	0.6	0.56	0.49	0.56	0.59	0.55		0.48
Rb	66	35	81	88	59	75	31	109	67
Sr	437	449	939	611	545	760	786	988	728
Ba	464	411	994	714		1115	1783		
Sc	27	54	28	20		21	12		
V	124	307	272	237		175	101		
Cr	688	343	103	76		133	55		
Co	45	43	27	29		23	12		
Ni	313	no data	7	15		45	36		
Y	15.23	27.2	18.51	19.08		32.29	20.30		
Nb	7.34	8.27	6.41	8.08		18.40	20.42		
Ta	1.20	1.47	0.41	0.52		1.18	1.43		
Zr	87.77	40.61	18.61	65.61		202.67	131.42		
Hf	2.47	1.75	0.59	1.39		4.77	3.29		
Pb	6.63	33.2	18.66	10.13		16.31	15.58		
U	1.76	3.49	1.98	2.45		4.61	3.95		
Th	5.71	4.42	4.38	6.59		22.15	15.58		
La	27.46	17.03	21.32	24.97		96.16	63.70		
Ce	62.10	40.96	50.51	53.2		191.46	145.73		
Pr	7.20	5.14	5.32	5.54		21.97	17.19		
Nd	29.39	22.72	23.04	22.23		82.25	62.7		
Sm	5.89	5.59	4.89	4.31		13.80	9.47		
Eu	1.60	1.63	1.45	1.13		3.62	2.50		
Gd	4.88	4.86	4.44	3.86		9.89	6.55		
Tb	0.62	0.77	0.63	0.56		1.27	0.82		
Dy	2.99	4.9	3.96	3.62		6.08	4.01		
Er	1.38	2.87	2.12	1.99		2.90	1.84		
Tm	0.18	0.44	0.30	0.28		0.41	0.27		
Yb	1.23	2.89	1.96	1.86		2.60	1.66		
Lu	0.17	0.54	0.27	0.26		0.37	0.23		
(La/Yb) <sub>n</sub>	14.93	4.40	7.28	8.89		24.74	25.67		
Sr/Y	28.71	16.51	50.71	32.03		23.55	38.70		
Dy/Yb	2.43	1.69	2.01	1.94		2.33	2.41		

П р и м е ч а н и е. 1. Содержания петрогенных компонентов приведены в мас. %, элементов-примесей – в г/т. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* – суммарное железо в форме Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. 2. Аналитические работы выполнены в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН. Определение петрогенных элементов и Rb, Sr проводилось рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре CPM-18 РАН, Na<sub>2</sub>O – пламенной фотометрией, ппп – стандартным химическим методом (аналитики Н.П. Горбунова, Г.С. Неупокоева, Л.А. Татарина). Концентрации других редких и редкоземельных элементов определены методом масс-спектрометрии индуктивно-связанной плазмы на приборе ELAN 9000 фирмы PerkinElmer (аналитик Д.В. Кисилева). 1 – синплутоническая дайка; 2–13 – «постгранитные» дайки: 2–5 – «простые» дайки диоритоидов, 6–10 – комбинированные дайки: а – мафическая часть комбинированной дайки, б – салическая часть комбинированной дайки, 11–13 – «простые» дайки гранитоидов.

N o t e. 1. The contents of petrogenic components are given in wt. %, impurity elements in g/t. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* – total iron in the form of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. 2. Analytical works were carried out at Geoanalitik Research Center, IGG UrB RAS, Ekaterinburg. Concentrations of petrogenic elements, Rb, and Sr were determined using a CPM-18 RAN 18 X-ray fluorescence spectrometer, Na<sub>2</sub>O – flame photometry, LOI – standard chemical method (analysts N.P. Gorbunova, G.S. Neupokoeva, and L.A. Tatarinova). Concentrations of other rare and REE elements were determined by mass spectrometry of inductively coupled plasma, using a PerkinElmer ELAN 9000 (analyst D.V. Kisileva). 1 – synplutonic dyke; 2–13 – 'post-granite' dykes: 2–5 – 'simple' dioritoid dykes, 6–10 – combined dykes: a – mafic part of the combined dyke, b – salic part of the combined dyke, 11–13 – 'simple' granitoid dykes.

О к о н ч а н и е   т а б л и ц ы

E n d   o f   T a b l e

	8a	8б	9a	9б	10a	10б	11	12	13
Компонент	Chl-425a	Chl-425b	Chl-244	Chl-243	Chl-403a	Chl-403b	Chl-404b	Chl-258	Chl-112b
SiO <sub>2</sub>	54.73	61.45	55.4	74.3	56.03	74.71	71.64	72.51	75.05
TiO <sub>2</sub>	1.07	0.66	0.81	0.12	0.85	0.09	0.12	0.14	0.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.33	16.77	15.03	14.39	15.35	14.66	15.35	14.71	13.27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	7.25	4.02	8.19	1.25	6.35	1.38	1.45	1.28	1.23
MnO	0.12	0.07	0.18	0.02	0.11	0.02	0.03	0.03	0.02
MgO	5.24	2.95	4.7	0.39	6.29	0.40	0.65	0.59	0.38
CaO	5.99	4.12	7.26	1.84	5.95	1.61	2.75	2.25	3.5
Na <sub>2</sub> O	3.7	4.7	3.57	5.04	2.7	4.9	5.65	6.47	4.2
K <sub>2</sub> O	2.79	2.46	2.7	1.88	3.46	1.08	1.05	0.96	0.75
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.25	0.21	0.28	0.07	0.25	0.04	0.08	0.03	0.05
LOI	1.1	0.8	1.29	0.27	2.7	0.9	1.4	0.7	0.58
Сумма	97.98	98.54	99.84	100.19	100.26	99.95	100.33	99.70	99.18
A/CNK	0.76	0.93	0.68	1.05	0.80	1.20	0.99	0.93	0.94
Mg#	0.59	0.59	0.53	0.38	0.66	0.37	0.47	0.48	0.38
Rb	78	87	66	34	86	31	32	15	31
Sr	795	839	561	285	780	637	677	291	643
Ba	642	979	517	369				419	215
Sc	15	4	19	2				2	17
V	111	45	181	10				8	19
Cr	98	77	93	no data				no data	30
Co	20	8	18	2				2	4
Ni	25	13	10	13				9	no data
Y	18.29	5.78	15.98	6.60				14.66	6.39
Nb	12.40	7.24	5.10	2.90				4.51	3.72
Ta	0.80	0.17	0.35	1.22				0.69	0.83
Zr	138.64	194.52	35.80	16.01				34.97	28.8
Hf	3.53	4.09	0.90	0.58				1.12	0.93
Pb	13.20	12.60	10.32	9.88				8.72	58.37
U	4.40	3.40	1.69	3.23				5.04	4.19
Th	7.69	18.58	3.25	2.55				4.42	15.77
La	37.14	68.58	13.48	4.81				5.81	10.25
Ce	76.13	122.43	32.03	9.41				12.54	17.16
Pr	7.66	10.45	3.57	1.00				1.30	1.85
Nd	29.16	33.14	15.30	3.51				4.58	6.76
Sm	5.51	4.01	3.28	0.77				1.04	1.18
Eu	1.57	1.06	0.98	0.30				0.39	0.35
Gd	4.57	1.91	3.10	0.78				1.55	0.99
Tb	0.63	0.22	0.46	0.16				0.27	0.12
Dy	4.03	1.23	3.03	1.23				2.34	0.78
Er	2.04	0.62	1.77	0.75				1.77	0.44
Tm	0.29	0.09	0.25	0.11				0.27	0.07
Yb	2.01	0.65	1.76	0.86				1.89	0.52
Lu	0.29	0.10	0.25	0.12				0.28	0.09
(La/Yb) <sub>n</sub>	12.36	70.66	5.12	3.74				2.05	13.20
Sr/Y	43.48	145.00	35.09	43.15				19.81	100.61
Dy/Yb	2.00	1.88	1.72	1.43				1.23	1.5

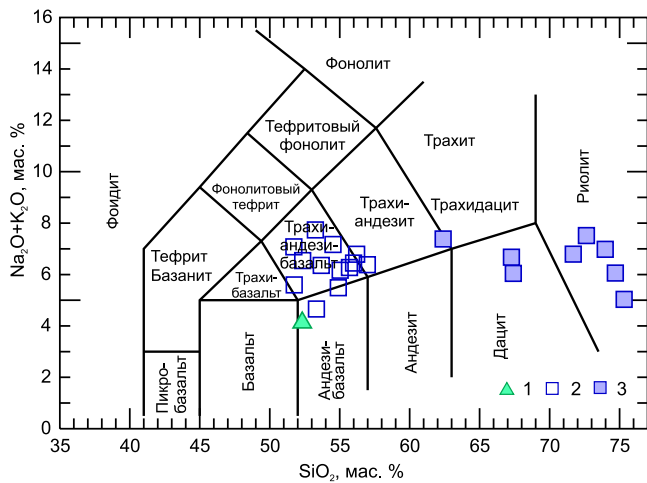
положительной европиевой аномалией (рис. 6). При этом меланодиорит из синплутонической дайки, по сравнению с меланократовыми породами «постгранитных» даек, несколько обеднен Ba, тяжелыми РЗЭ, что обуславливает больший наклон кривой: (La/Yb)<sub>n</sub>~15 против 4.5–12.5 соответственно (таблица, рис. 6).

В отличие от диоритоидов, все гранитоиды – и в простых, и в комбинированных дайках – принадлежат умереннокалиевому ряду. Наиболее высоко-

натриевые и, соответственно, обедненные калием разности представляют собой альбитизированные породы, и реставрация их первичных составов с учетом количества «шахматного» альбита переводит их из области низкокалиевых в область умереннокалиевых. Важно отметить также, что валовый химический состав неизменных гранитоидных даек не всегда отвечает котектическому.

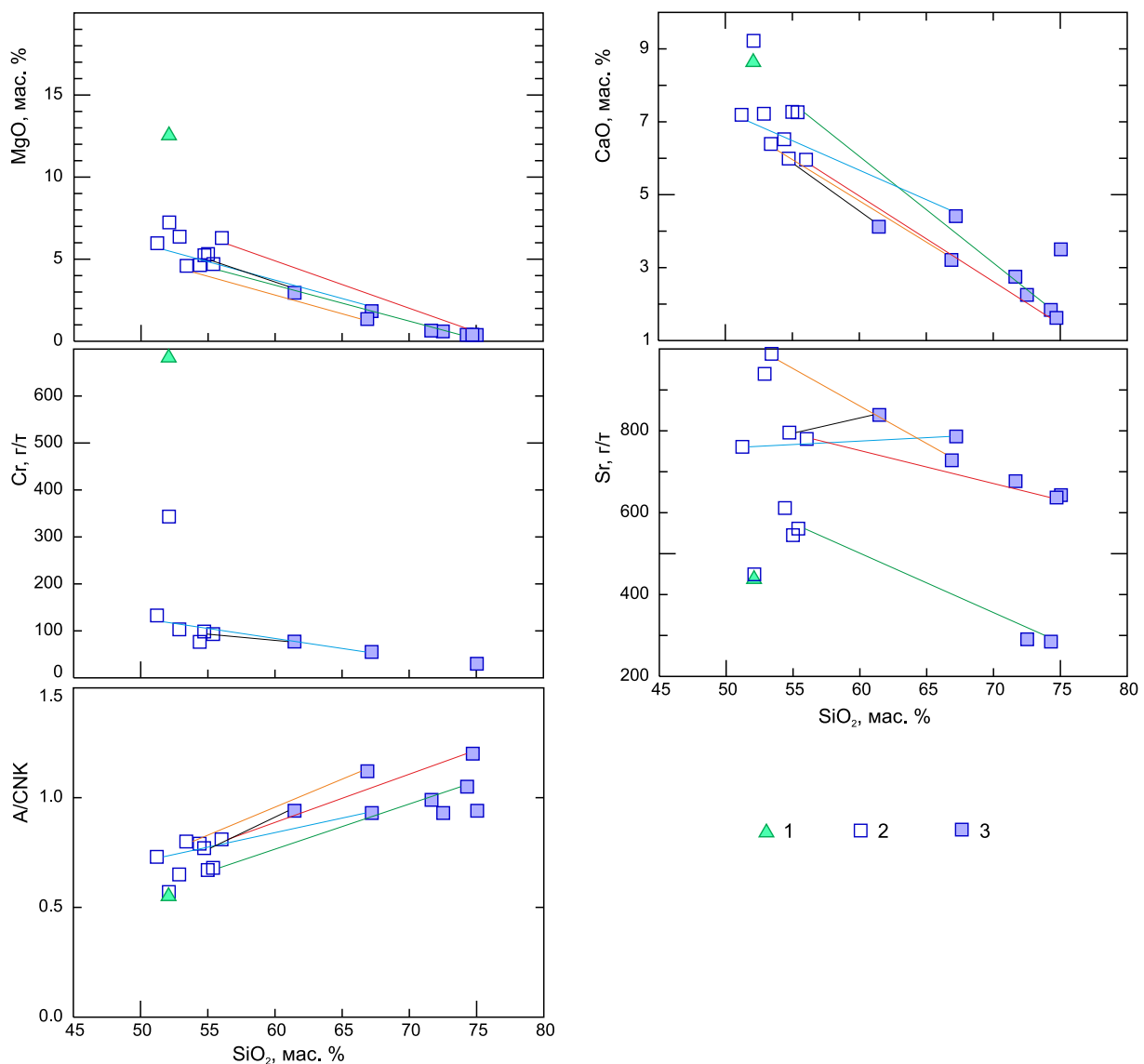
Геохимические особенности гранитоидов зависят от основности: наиболее кислые разности





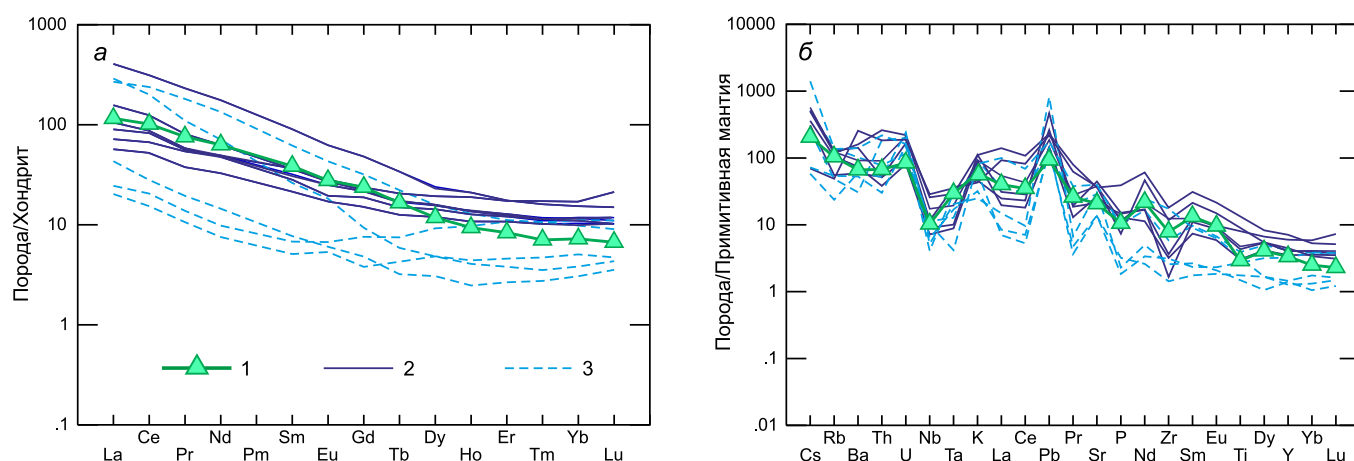
**Рис. 4.** Диаграмма TAS для даек Челябинского массива. 1 – меланодиорит из синплутонической дайки; 2, 3 – «постгранитные» дайки: 2 – «базитовые» дайки, 3 – дайки гранитоидов.

**Fig. 4.** TAS diagram for dykes, Chelyabinsk massif. 1 – melanodiorite from the synplutonic dyke; 2, 3 – ‘post-granite’ dykes: 2 – ‘mafic’ dykes, 3 – granitoids dykes.



**Рис. 5.** Вариационные диаграммы для синплутонической и «постгранитных» даек Челябинского массива. Условные обозначения приведены на рис. 4. Цветными линиями соединены мафические и салические части комбинированных даек.

**Fig. 5.** Variation diagrams for synplutonic and ‘post-granite’ dykes, Chelyabinsk massif. See the legend in Fig. 4. The mafic and salic parts of the combined dykes are connected by colored lines.



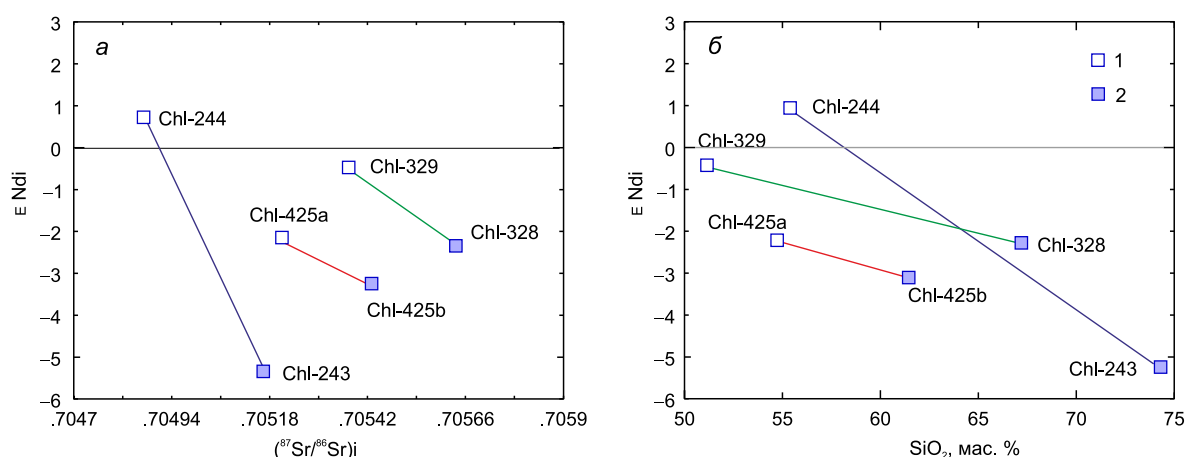
**Рис. 6.** Хондрит-нормированное распределение РЗЭ (а) и нормированный к примитивной мантии (б) состав синплутонической (1) и «постгранитных» (2, 3) даек. 1 – меланодиорит из синплутонической дайки; 2–3 – «постгранитные» дайки: 2 – «базитовые» дайки, 3 – дайки гранитоидов. Нормировка на хондрит выполнена по [Sun, 1980], на примитивную мантию – по [Sun, McDonough, 1989].

**Fig. 6.** Chondrite-normalized distribution of REE (a), and normalized-to-primitive-mantle (b) compositions of synplutonic (1) and 'post-granite' (2, 3) dykes. 1 – melanodiorite of the synplutonic dyke; 2–3 – 'post-granite' dykes: 2 – 'mafic' dykes, 3 – granitoid dykes. Normalization to chondrite after [Sun, 1980]. Normalization to primitive mantle after [Sun, McDonough, 1989].

(71–75 мас. %) характеризуются сравнительно невысокими суммарными концентрациями РЗЭ (до 50 г/т) и умеренной степенью дифференциации спектра (значения  $(La/Yb)_n$  не превышают 15); менее кремнекислые содержат в сумме свыше 200 г/т РЗЭ при более дифференцированном спектре (значения  $(La/Yb)_n$  более 25). Для всех пород типично отсутствие или наличие очень слабо выраженной

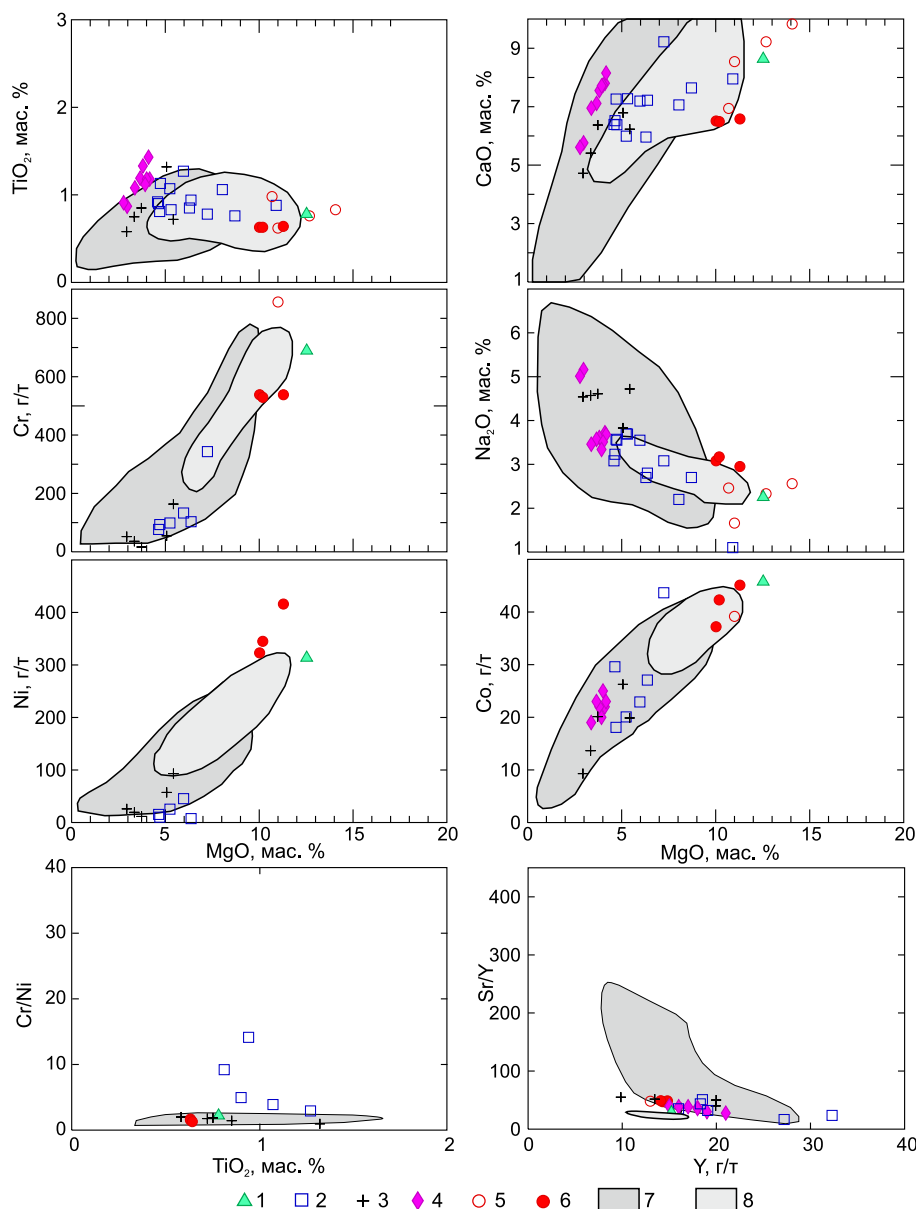
положительной европиевой аномалии (таблица, рис. 6).

Имеющиеся данные по изотопному составу Nd и Sr в «постгранитных» комбинированных дайках не отвечают простой модели смешения двух компонентов (рис. 7). Диоритоиды характеризуются близкими к 0 значениями  $\epsilon Nd$  (от +1 до -2) и вариациями  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$  от 0.70485 до 0.70571. Для гра-



**Рис. 7.** Изотопные составы Sr и Nd в комбинированных дайках Челябинского массива. 1 – мафическая часть; 2 – салическая часть. Цветными линиями соединены мафические и салические части комбинированных даек. Исследования выполнены в ГИ КНЦ РАН на масс-спектрометрах Finnigan-MAT-262.

**Fig. 7.** Isotopic compositions of Sr and Nd in combined dykes, Chelyabinsk massif. 1 – mafic part; 2 – salic part. Colored lines connect the mafic and salic parts of the combined dykes. The analysis was performed with the use of Finnigan-MAT-262 mass spectrometers in the Institute of Geology, Kola Scientific Centre RAS, Apatity.



**Рис. 8.** Вариационные диаграммы для мафических дайк Челябинского массива. 1, 2 – дайки Челябинского массива: 1 – синплутоническая дайка, 2 – «пост-гранитные» дайки; 3 – синплутонические дайки Верхисетского массива [Zin'kova, Fershtater, 2007]; 4 – синплутонические дайки Сьерра-Невады [Barbarin, 1991]; 5 – высокомагнезиальный меланодиорит Шабровского массива [Pushkarev, Osipova, 1993; Pribavkin, 2000]; 6 – высокомагнезиальные диориты Северного Китая [Qian, Hermann, 2010]; 7 – архейские санукитоиды [Martin et al., 2005]; 8 – санукитоиды Setouchi (Япония) [Tatsumi, 2008].

**Fig. 8.** Variation diagrams for mafic dykes, Chelyabinsk massif. 1, 2 – dykes of the Chelyabinsk massif: 1 – synplutonic dyke, 2 – 'post-granite' dyke; 3 – synplutonic dykes of the Verkhiset massif [Zin'kova, Fershtater, 2007]; 4 – synplutonic dykes of Sierra Nevada [Barbarin, 1991]; 5 – high-Mg melanodiorite of the Shabrov massif [Pushkarev, Osipova, 1993; Pribavkin, 2000]; 6 – high-Mg diorites of North China [Qian, Hermann, 2010]; 7 – Archean sanukitoids [Martin et al., 2005]; 8 – sanukitoids of Setouchi (Japan) [Tatsumi, 2008].

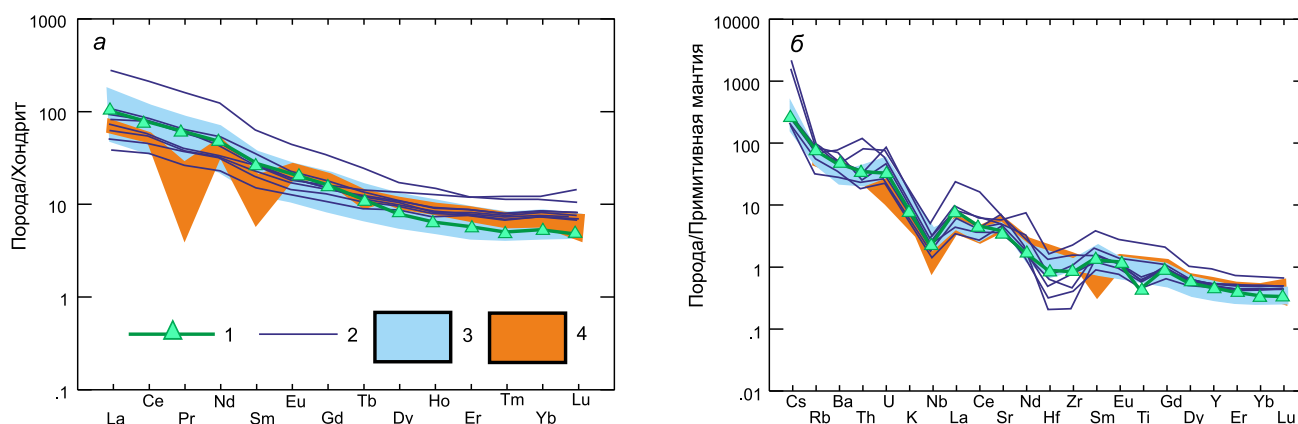
нитоидов типичны отрицательные величины  $\varepsilon\text{Nd}$  (от  $-2$  до  $-5$ ) и, в целом, более радиогенный стронций (значения  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  варьируются от 0.70517 до 0.70567 (рис. 7, а). При этом в каждой комбинированной дайке мафическая часть отличается от салической более высокими значениями  $\varepsilon\text{Nd}$  и менее радиогенным стронцием, а разница в значениях  $\varepsilon\text{Nd}$  и  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  «базитовой» и гранитоидной частей дайки тем больше, чем больше разница в их кремнекислотности (рис. 7, б).

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Повышенные содержания MgO, K<sub>2</sub>O, Sr, высокий Mg#, фракционированное распределение РЗЭ и отсутствие заметной Eu-аномалии, пониженные концентрации TiO<sub>2</sub>, Y (рис. 8) позволяют сопоставить

диоритовые породы дайк Челябинского массива по химическому составу с санукитоидами [Martin et al., 2005; Tatsumi, 2008]. В то же время обогащение ЛРЗЭ, заметные отрицательные Nb и Ti аномалии (рис. 9) сближают постгранитные меланократовые дайки Челябинского массива с характерными для окраинно-континентальных гранитоидных батолитов синплутоническими дайками пород среднего состава, в т.ч. уральскими [Barbarin, 1991; Zin'kova, Fershtater, 2007], а меланодиорит синплутонической дайки, по очень высоким концентрациям MgO (12.5 мас. %), Cr, Ni, Co (690, 313 и 46 г/т соответственно), значению Mg# (0.74) (таблица, рис. 8, 10) – с высокомагнезиальными диоритами Han-Xing Северного Китая [Qian, Hermann, 2010], а также сингранитным меланодиоритом Шабровского массива на Среднем Урале [Pushkarev, Osipova, 1993; Pribavkin, 2000]. Гранит-





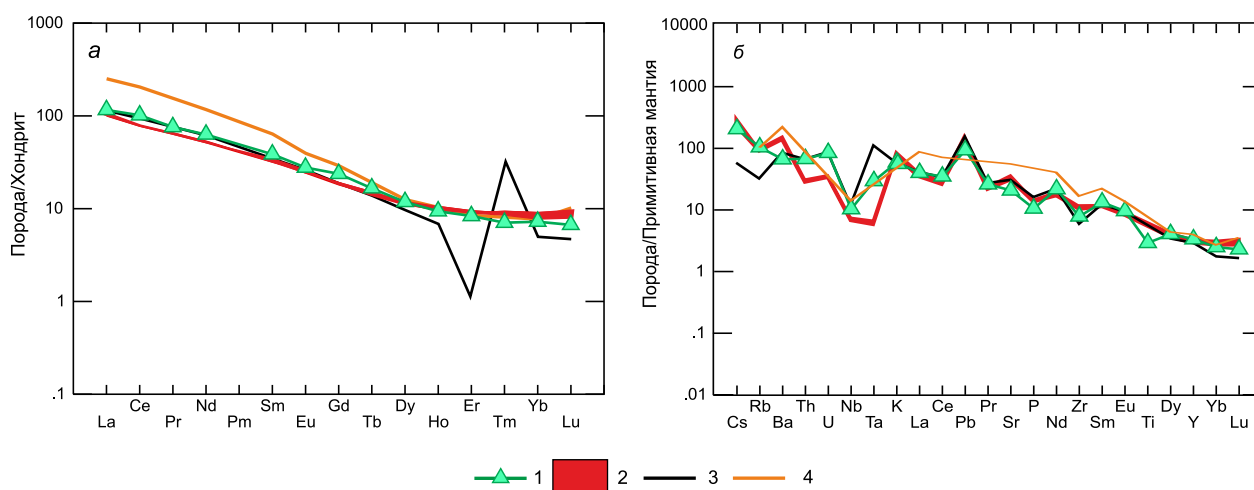
**Рис. 9.** Распределения РЗЭ, нормированные к хондриту (а), и нормированные к примитивной мантии (б) составы меланократовых даек Челябинского массива. 1, 2 – дайки Челябинского массива: 1 – синплутоническая дайка, 2 – «постгранитные» меланократовые дайки; 3 – синплутонические дайки Верхисетского массива [Zin'kova, Fershtater, 2007]; 4 – мафические дайки Сьерра-Невады [Barbarin, 1991].

**Fig. 9.** Chondrite-normalized distributions of REE (a), and normalized-to-primitive mantle (b) compositions of melanocratic dykes, Chelyabinsk massif. 1, 2 – dykes of the Chelyabinsk massif: 1 – synplutonic dyke, 2 – 'post-granite' melanocratic dykes; 3 – synplutonic dykes of the Verkhiset massif [Zin'kova, Fershtater, 2007]; 4 – mafic dykes of Sierra Nevada [Barbarin, 1991].

ные породы из даек Челябинского массива по некоторым геохимическим характеристикам – высоким концентрациям Sr, низким – ТРЗЭ и Y (таблица) – могут быть сопоставлены с высококремнеземистыми адакитами [Martin et al., 2005; Castillo, 2012; Mazhari, 2016], но одновременно имеют ряд существенных отличий от них – обеднены  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (менее 15 мас. %), характеризуются менее фракционированным распределением РЗЭ –  $(\text{La}/\text{Yb})_n$

менее 15 и в целом не могут быть отнесены к этой своеобразной группе гранитоидов.

Высокомagneзиальные породы среднего состава описаны в многочисленных публикациях [Martin et al., 2005; Qian, Hermann, 2010; Castillo, 2012; Mazhari, 2016; и др.] в условиях конвергентных границ и интраконтинентальных обстановках на разных возрастных уровнях. К настоящему времени для объяснения их образования рассматриваются различ-



**Рис. 10.** Распределения РЗЭ, нормированные к хондриту (а), и нормированные к примитивной мантии (б) составы даек Челябинского массива. 1 – синплутоническая дайка Челябинского массива; 2 – высокомагнезиальные диориты Северного Китая [Qian, Hermann, 2010]; 3 – высокомагнезиальный меланодиорит Шабровского массива [Pushkarev, Osipova, 1993; Pribavkin, 2000]; 4 – санукитоиды [Martin et al., 2005].

**Fig. 10.** Chondrite-normalized REE distributions (a), and normalized-to-primitive mantle (b) compositions of dykes, Chelyabinsk massif. 1 – synplutonic dyke of the Chelyabinsk massif; 2 – high-Mg diorites of North China [Qian, Hermann, 2010]; 3 – high-Mg melanodiorite of the Shabrov massif [Pushkarev, Osipova, 1993; Pribavkin, 2000]; 4 – sanukitoids [Martin et al., 2005].

ные механизмы корово-мантийного взаимодействия. Для реализации предложен ряд моделей, существование которых могут отразить следующие основные варианты: 1) парциальное плавление обогащенной коровыми расплавами или флюидами мантии в субдукционных зонах; 2) ассимиляция мантийного перидотита восходящими кислыми выплавками из погруженного слэба океанической коры при взаимодействии с мантийным клином; 3) деламинация и парциальное плавление нижней коры базитового состава и взаимодействие выплавки с вышележащим перидотитом; 4) взаимодействие нижнекоровых кислых расплавов с фрагментами перидотита, выведенными на средне- или верхнекоровый уровень в ходе предшествующих орогенических событий.

В Челябинском массиве в минеральном составе всех меланократовых даек главная роль принадлежит амфиболу и биотиту, что указывает на значимую роль  $H_2O$  в процессе магмогенерации. В постгранитных диоритоидах неоднородные по знаку и величине значения  $\varepsilon Nd(t)$ , относительно радиогенный изотопный состав стронция и обогащенность их состава  $K_2O$  (см. рис. 7, таблица) не позволяют связать формирование кислого расплава (корового компонента) с образованием за счет парциального плавления погруженного слэба океанической коры и подтверждают участие сиалического корового источника, а повышенные концентрации ТРЗЭ (см. рис. 9) не согласуются с моделью плавления нижней коры с образованием экологитового рестита. В то же время данные об изотопном составе Nd и Sr в кислых дайках (см. рис. 7), с одной стороны, накладывают ограничения на реализацию механизма прямого смешения основного и кислого расплава, а с другой – свидетельствуют о связи исходных кислого и основного расплавов с разными источниками и не согласуются с гипотезой «автомигматизации» диоритоидов [Fershtater et al., 2004]. На настоящий момент времени наиболее вероятным представляется вариант взаимо-

действия мантийного источника с кислыми расплавами, генерированными при рециклинге гранитных пород юной уральской континентальной коры типа венд-кембрийской ТТГ-ассоциации, рассмотренной в работе [Popov et al., 2003]. Мантийный компонент может быть представлен обогащенным мантийным перидотитом либо базитом, связанным с обогащенным источником. Для создания конкретной модели образования меланодиорита синплутонической дайки имеющегося фактического материала недостаточно. Предложенный для очень близких по химическому составу высокомагнезиальных диоритов Северного Китая (рис. 10) механизм взаимодействия нижнекоровых кислых расплавов с материалом перидотита на коровом уровне [Qian, Hermann, 2010] в настоящее время для Челябинского массива не имеет сколько-нибудь убедительных свидетельств. Однако для очень близкого по составу сингранитного меланодиорита Шабровского массива позднекаменноугольного возраста на Среднем Урале [Pribavkin, Pushkarev, 2011] он имеет геологическое подтверждение в виде ксенолитов ультрамафических пород, присутствующих в составе массива и его ближайшего окружения. Тем не менее сложно представить разный механизм образования столь своеобразных по составу пород в одной геологической структуре, хотя и принадлежащих разным возрастным уровням. Это обуславливает необходимость разработки модели, удовлетворительно описывающей образование меланодиоритов и на Южном, и на Среднем Урале, определяющим фактором для которого, скорее всего, являются особенности состава мантийного источника. При этом важно подчеркнуть, что факт внедрения столь близких по составу меланодиоритов на разных этапах развития Уральского складчатого пояса – субдукционном и коллизионном – не позволяет рассматривать эти породы в качестве индикаторных для диагностики характера геодинамической обстановки их формирования.

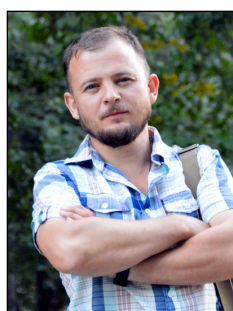
## 6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Barbarin B., 1991. Enclaves of the Mesozoic calc-alkaline granitoids of the Sierra Nevada Batholith, California. In: J. Didier, B. Barbarin (Eds.), Enclaves and granite petrology. Development in petrology, vol. 13. Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo, p. 135–153.
- Barbarin B., 2005. Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California: nature, origin, and relations with the hosts. *Lithos* 80 (1–4), 155–177. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.05.010>.
- Burmakina G.N., Tsygankov A.A., 2010. Mantle magmatism in granitoid petrogenesis of the Western Transbaikalia. In: Modern problems of geology and mineral exploration. Proceedings of the International Conference. TPU Publishing House, Tomsk, p. 31–35 (in Russian) [Бурмакина Г.Н., Цыганков А.А. Мантийный магматизм в гранитоидном петрогенезисе Западного Забайкалья // Современные проблемы геологии и разведки полезных ископаемых: Материалы международной конференции. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. С. 31–35].
- Castillo R.C., 2012. Adakite petrogenesis. *Lithos* 134–135, 304–316. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.09.013>.

- Collins W.J., Richards S.R., Healy B.E., Ellison P.I., 2000. Origin of heterogeneous mafic enclaves by two-stage hybridisation in magma conduits (dykes) below and in granitic magma chambers. *Transactions of The Royal Society of Edinburgh: Earth and Environmental Science* 91 (1–2), 27–45. <https://doi.org/10.1017/S0263593300007276>.
- D'Lemos R.S., 1992. Magma-mingling and melt modification between granitic pipes and host diorite, Guernsey, Channel Islands. *Journal of the Geological Society* 149 (5), 709–720. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.149.5.0709>.
- Fedorovsky V.S., Khromykh S.V., Sukhorukov V.P., Kuibida M.L., Vladimirov A.G., Sklyarov E.V., Dokukina K.A., Chamov S.N., 2003. Metamorphic mingling (a new type of mingling structure). In: *Tectonics and geodynamics of continental crust. Proceedings of the XXXVI Tectonic conference. Vol. II. GEOS, Moscow*, p. 255–259 (in Russian) [Федоровский В.С., Хромых С.В., Сухоруков В.П., Куйбида М.Л., Владимиров А.Г., Скляров Е.В., Докукина К.А., Чамов С.Н. Метаморфический минглинг (новый тип минглинг-структур) // Тектоника и геодинамика континентальной литосферы: Материалы XXXVI тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2003. Т. II. С. 255–259].
- Fershtater G.B., Bea F., Montero M.P., Scarrow J., 2004. Hornblende gabbro in the Urals: types, geochemistry, and petrogenesis. *Geochemistry international* 42 (7), 610–629.
- Frost T.P., Mahood G.A., 1987. Field, chemical, and physical constraints on mafic-felsic magma interaction the Lamarck granodiorite, Sierra Nevada, California, USA. *Geological Society of America Bulletin* 99 (2), 272–291. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1987\)99<272:FCAPCO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1987)99<272:FCAPCO>2.0.CO;2).
- Karmysheva I.V., Vladimirov V.G., Vladimirov A.G., Shelepaev R.A., Yakovlev V.A., Vasyukova E.A., 2015. Tectonic position of mingling dykes in accretion-collision system of early Caledonides of West Sangilen (South-East Tuva, Russia). *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (3), 289–310. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-3-0183>.
- Litvinovsky B.A., Zanzilevich A.N., Kalmanovich M.A., 1995a. Multiple mixing of coexisting syenitic and basaltic magmas and its petrological implications, Ust'-Kholok massif, Transbaikalia. *Petrologiya (Petrology)* 3 (2), 133–157 (in Russian) [Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н., Калманович М.А. Многократное смешение сосуществующих сиенитовых и базитовых магм и его петрологическое значение, Усть-Хилокский массив, Забайкалье // *Петрология*. 1995. Т. 3. № 2. С. 133–157].
- Litvinovsky B.A., Zanzilevich A.N., Lyapunov S.M., Bindeman I.N., Davis A.M., Kalmanovich M.A., 1995b. Model of composite basite-granitoid dike generation (Shaluta pluton, Transbaikalia). *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 36 (7), 3–22 (in Russian) [Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н., Ляпунов С.М., Биндеман И.Н., Дэвис А.М., Калманович М.А. Условия образования комбинированных базит-гранитных даек (Шалутинский массив, Забайкалье) // *Геология и геофизика*. 1995. Т. 36. № 7. С. 3–22].
- Marshall L.A., Sparks R.S.J., 1984. Origin of same mixed-magma and net-veined ring intrusions. *Journal of the Geological Society* 141 (1), 171–182. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.141.1.0171>.
- Martin H., Smithies R.H., Rapp R., Moyen J.-F., Champion D., 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos* 79 (1–2), 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.048>.
- Mazhari S.A., 2016. Petrogenesis of adakite and high-Nb basalt association in the SW of Sabzevar zone, NE of Iran: Evidence for slab meltemantle interaction. *Journal of African Earth Sciences* 116, 170–181. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.12.026>.
- Pitcher W.S., 1991. Synplutonic dykes and mafic enclaves. In: J. Didier, B. Barbarin (Eds.), *Enclaves and granite petrology. Development in petrology*, vol. 13. Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo, p. 389–391.
- Popov V.S., 1984. Magma mixing as petrogenetic process (review). *Proceedings of the All-Union Mineralogical Society* 113 (2), 229–240 (in Russian) [Попов В.С. Смешение магм – петрогенетический процесс (обзор иностранной литературы) // *Записки Всесоюзного минералогического общества*. 1984. Т. 113. № 2. С. 229–240].
- Popov V.S., Tevelev A.V., Belyatsky B.V., Bogatov V.I., Petrova A.Yu., Zhuravlev D.Z., Osipova T.A., 2003. The isotopic composition of Nd and Sr in granitoids of the Urals as an indicator of the mantle-crust interaction. *Proceedings of the All-Russia Mineralogical Society* 132 (3), 16–38 (in Russian) [Попов В.С., Тевелев А.В., Беляцкий Б.В., Богатов В.И., Петрова А.Ю., Журавлев Д.З., Осипова Т.А. Изотопный состав Nd и Sr в гранитоидах Урала как показатель взаимодействия мантия-кора // *Записки Всероссийского минералогического общества*. 2003. Т. 132. № 3. С. 16–38].
- Pribavkin S.V., 2000. Petrology of Basic Rocks in Granitoids of the Shabrov and Shartash massifs. Author's Abstract of PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Ekaterinburg, 28 p. (in Russian) [Прибавкин С.В. Петрология основных пород в гранитоидах Шабровского и Шарташского массивов: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург, 2000. 28 с.].
- Pribavkin S.V., Pushkarev E.V., 2011. The age of late orogenic granitoids of the Urals based on U-Pb isotope dating of zircons (Exemplified by the Shartash and Shabry massifs). *Doklady Earth Sciences* 438 (1), 627–631. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11050369>.
- Puchkov V.N., 2010. Geology of the Urals and Cis-Urals (Actual Problems of Stratigraphy, Tectonics, Geodynamics and Metallogeny). DesignPoligraphService, Ufa, 280 p. (in Russian) [Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.].
- Pushkarev E.V., Osipova T.A., 1993. Granitoid inclusions in basic rocks of the Shabrov massif. Yearbook–1992. IGG UrB RAS, Ekaterinburg, p. 44–47 (in Russian) [Пушкарёв Е.В., Осипова Т.А. Гранитоидные включения в базитах Шабровского массива // *Ежегодник–1992. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН*, 1993. С. 44–47].



- Qian Q., Hermann J., 2010. Formation of High-Mg diorites through assimilation of peridotite by monzodiorite magma at crustal depths. *Journal of Petrology* 57 (7), 1381–1416. <https://doi.org/10.1093/petrology/egq023>.
- Sklyarov E.V., Fedorovskii V.S., 2006. Magma mingling: tectonic and geodynamic implications. *Geotectonics* 40 (2), 120–134. <https://doi.org/10.1134/S001685210602004X>.
- Sun S.S., 1980. Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island arcs. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 297 (1431), 409–445. <https://doi.org/10.1098/rsta.1980.0224>.
- Sun S.S., McDonough W.E., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A.D. Sanders, M.J. Norry (Eds.), *Magmatism in the oceanic basins*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 42, p. 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>.
- Tatsumi Y., 2008. Making continental crust: The sanukitoid connection. *Chinese Science Bulletin* 53 (11), 1620–1633. <https://doi.org/10.1007/s11434-008-0185-9>.
- Titov A.V., Litvinovsky B.A., Zanzilevich A.N., Shadaev M.G., 2000. Hybridization in composite basic-rock-leucogranite dikes of the Ust'-Khilok massif (Transbaikalia). *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 41 (12), 1714–1728.
- Wiebe R.A. 1973. Relations between coexisting basaltic and granitic magmas in a composite dike. *American Journal of Science* 273 (2), 130–151. <https://doi.org/10.2475/ajs.273.2.130>.
- Wiebe R.A., Ulrich R., 1997. Origin of composition dikes in the Gouldsboro granite, coastal Maine. *Lithos* 40 (2–4), 157–178. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(97\)00008-X](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(97)00008-X).
- Zin'kova E.A., Fershtater G.B., 2007. Synplutonic dykes in Verkhisetsk granitoid massif (Middle Ural). *Litosfera (Lithosphere)* (2), 141–151 (in Russian) [Зинькова Е.А., Ферштатер Г.Б., 2007. Синплутонические дайки в гранитоидах Верхисетского массива (Средний Урал) // *Литосфера*. 2007. № 2. С. 141–151].



**Каллистов Геннадий Александрович**, канд. геол.-мин. наук, н.с.  
Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН  
620016, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, Россия  
Уральский федеральный университет  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия  
✉ e-mail: [Kallistov@igg.uran.ru](mailto:Kallistov@igg.uran.ru)

**Kallistov, Gennady A.**, Candidate of Geology and Mineralogy, Researcher  
A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS  
15 Akademik Vonsovsky street, Ekaterinburg 620016, Russia  
Ural Federal University  
19 Mira street, Ekaterinburg 620002, Russia  
✉ e-mail: [Kallistov@igg.uran.ru](mailto:Kallistov@igg.uran.ru)



**Осипова Татьяна Алексеевна**, канд. геол.-мин. наук, ученый секретарь  
Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН  
620016, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, Россия  
e-mail: [osipova@igg.uran.ru](mailto:osipova@igg.uran.ru)

**Osipova, Tatiana A.**, Candidate of Geology and Mineralogy, Secretary for Scientific Affairs  
A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS  
15 Akademik Vonsovsky street, Ekaterinburg 620016, Russia  
e-mail: [osipova@igg.uran.ru](mailto:osipova@igg.uran.ru)